

연구논문

MaxEnt 모형을 이용한 기후변화에 따른 산사태 발생가능성 예측

김호걸* · 이동근** · 모용원* · 길승호* · 박 찬*** · 이수재****

서울대학교 대학원*, 서울대학교 조경·지역시스템공학부**, 국립환경과학원 기후변화연구과***, 한국환경정책·평가연구원
(2012년 11월 27일 접수, 2013년 1월 16일 승인)

Prediction of Landslides Occurrence Probability under Climate Change using MaxEnt Model

Kim, Hogul* · Lee, Dong-Kun** · Mo, Yongwon* · Kil, Sungho* · Park, Chan*** · Lee, Soojae****

Graduate School, Seoul National University*

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University**

National Institute of Environmental Research, Climate Change Research Division***, Korea Environment Institute****

(Manuscript received 27 November 2012; accepted 16 January 2013)

Abstract

Occurrence of landslides has been increasing due to extreme weather events(e.g. heavy rainfall, torrential rains) by climate change. Pyeongchang, Korea had seriously been damaged by landslides caused by a typhoon, Ewinar in 2006. Moreover, the frequency and intensity of landslides are increasing in summer due to torrential rain. Therefore, risk assessment and adaptation measure is urgently needed to build resilience. To support landslide adaptation measures, this study predicted landslides occurrence using MaxEnt model and suggested susceptibility map of landslides. Precipitation data of RCP 8.5 Climate change scenarios were used to analyze an impact of increase in rainfall in the future. In 2050 and 2090, the probability of landslides occurrence was predicted to increase. These were due to an increase in heavy rainfall and cumulative rainfall. As a result of analysis, factors that has major impact on landslide appeared to be climate factors, prediction accuracy of the model was very high(92%). In the future Pyeongchang will have serious rainfall compare to 2006 and more intense landslides area expected to increase. This study will help to establish adaptation measure against landslides due to heavy rainfall.

Keywords : maximum entropy model, RCP 8.5 scenario, heavy rainfall, landslide susceptibility

1. 서론

기후변화의 영향으로 다양한 극한 기상현상이 발생하고 있다. 그 중에서도 태풍과 집중강우는 산사태, 홍수 등 인명피해가 심각한 재해를 야기하고 있다. 특히 최근 우면산 산사태 발생 이후, 산사태 발생예측 및 방지에 대한 관심이 커지고 있다.

산사태에 영향을 주는 요인은 크게 내적요인과 외적요인으로 구분할 수 있다(김경수 등, 2005). 내적요인은 지질요인과 지형요인을 의미하며, 외적요인은 기후요인으로 볼 수 있다(이부경, 2003). 세부적으로는 경사, 고도, 방위, 토심, 식생분포, 영급, 경급, 강우량 등이 산사태와 관련성이 높은 변수들이다. 특히 우리나라는 강우량이 집중되는 여름철에 산사태가 많이 발생하기 때문에 산사태의 주요한 원인은 기후요인이라고 할 수 있다(김석우 등, 2012).

집중강우로 인하여 산사태가 발생하기까지의 과정은 다음과 같이 정리할 수 있다. 산림에서 강우가 발생하면, 수관에 의해 강우차단이 일어나고 차단되지 않은 강우는 지표면을 흐르거나 침투되어 지하수위와 지하수압력을 상승시킨다. 이는 지반의 중량을 증가시키고 공극수압을 높인다(이부경, 2003). 공극수압이 높아지면 사면의 안전율이 감소되어, 사면의 전단강도보다 전단응력이 커져서 산사태가 발생하게 된다(Mathewson *et al.*, 1990). 우리나라에서 발생하는 산사태의 대부분이 이러한 과정을 거치게 된다.

현재까지 국내에서 진행된 산사태 연구는 산사태가 발생한 지역을 조사하여 여러 요인들의 특성분석을 통해 원인을 규명하는 연구, 요인들의 상관관계를 통계적으로 분석하여 가중치를 설정하고 발생가능성을 예측하는 연구, 로지스틱 회귀분석이나 인공신경망 모형을 활용하여 통계적인 방법으로 산사태 발생가능성을 예측하는 연구 등이 있다.

특히 산사태에 영향을 미치는 변수를 파악하고 GIS를 이용한 중첩분석을 실시하여 산사태 위험지역을 예측하는 연구가 다수를 차지하고 있으며(이수곤, 1999; 이진덕 등, 2002; 조명희와 조운원, 2009; 오치영 등, 2009; 윤홍식 등, 2009), 2010

년대에 들어서면서 본격적으로 다양한 통계적 분석을 이용한 연구가 실시되었다. 산사태 발생지역이 갖는 특성들을 분석하기 위한 연구를 실시한 박종민 등(2010)은 산사태 발생지역의 지형과 식생과 관련된 변수들에 대하여 비교분석, 출현빈도분석, 상관분석을 실시하였다. 이를 통해 산사태 발생지역의 특성들을 도출하였으나, 산사태 발생가능성을 예측하거나 기상현상과 산사태와의 관계를 분석하지는 않았다. 한편, 김기홍 등(2011)은 산사태 발생지의 강우와 지형적 특성을 분석하였으며, 산사태가 발생한 지역과 시간의 시간강우량과 연속강우량, 경사, 고도, 지질, 식생의 특성들을 도출하였다. 그러나 자료를 바탕으로 산사태 발생가능성을 예측하지는 않았다.

특히 최근에 통계적인 모형을 활용하여 산사태 발생가능성을 예측하는 연구들이 실시되었다. Pradhan and Lee(2010)은 빈도비모형, 로지스틱 회귀분석 모형, 인공신경망 모형을 활용하여 산사태 발생가능성을 분석하고 모형 간 비교연구를 실시하였다. 권혁춘 등(2011)은 제주지역을 대상으로 로지스틱회귀분석과 인공신경망 모형을 활용하여 산사태 가능성을 분석하였다. 산사태 예측에서 가장 대표적으로 사용되는 모형들을 이용하였다는 점과 현장조사를 통해 토질물성자료를 구축하였다는 점에서 의의를 갖는다고 판단된다. 연영광(2011)은 강원도 인제군을 대상으로 로지스틱 회귀분석을 실시하였으며, 모형의 정확도를 검증하는데 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 지형, 토양, 임상에 관한 변수를 사용하였으나, 기상과 관련된 변수는 반영하지 않았다. 이명진 등(2012)은 미래의 강우량을 확률적으로 반영하고 인공신경망 모형에 반영하여 산사태 위험도를 분석하였다.

산사태에 대한 선행연구들은 산사태와 관련된 다양한 변수들을 파악하는 단계에서, 통계적인 분석을 통한 변수 간의 상관관계를 파악하는 단계를 거쳐서, 산사태 발생지점과 변수 간의 관계를 기반으로 통계적인 모형을 통해 산사태 발생가능성을 예측하는 단계로 진행되었다. 특히 최근에는 기후변

화의 영향으로 강우량이 증가함에 따라, 산사태 발생 예측에 있어서 강우량을 반영하는 방안에 초점을 맞춘 연구가 이루어지고 있다(김석우 등, 2012).

이에 본 연구에서는 우리나라의 산사태가 주로 강우량에 의해 발생한다는 사실에 주목하여 기후변화로 인한 강우량 증가를 반영한 산사태 발생가능성 예측 연구를 실시하였다. 이를 위하여 기상청의 기후변화 시나리오 RCP 8.5를 이용하여 미래 시점의 강우량을 추출하고 산사태 발생가능성 예측에 반영하였다. 대상지는 2006년 태풍 에위니아로 인해 대규모의 산사태 피해를 입은 강원도 평창군으로 선정하였다. 연구결과를 통해 현재와 미래에 산사태 발생가능성이 높은 지역을 도출함으로써 산사태 적응대책 수립 중점지역 파악에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 기후변화에 의한 강우량 증가에 대비한 효과적인 산사태 적응대책 수립이 가능할 것으로 기대된다.

II. 연구의 내용 및 방법

1. 연구의 흐름

본 연구의 흐름은 그림 1과 같다. 산사태와 산사태에 영향을 미치는 주요 변수에 대한 선행연구를 실시하고 대상지를 선정하였다. 이어서 산사태 발생가능성 분석에 이용할 통계적 분포모형에 대한 연구를 실시하여 MaxEnt 모형이 선정되었으며, 분석에 사용될 자료를 구축 및 제작하였다. 산사태 발생가능성은 현재와 미래를 대상으로 실시하였으며, 현재의 모형을 다른 지역에 적용하여 검증하였다. 분석결과를 바탕으로 주요 변수에 대한 반응곡선을 해석하고 위험지역을 파악하였다.

2. 산사태 발생가능성 분석 방법

(I) 통계적 분포 모형 연구

발생가능성 분석에 이용할 통계적 분포모형을 선정하기 위해 산사태 발생 예측에 사용되는 통계적 모형들의 특성을 파악하였다. 통계적 모형은 크게

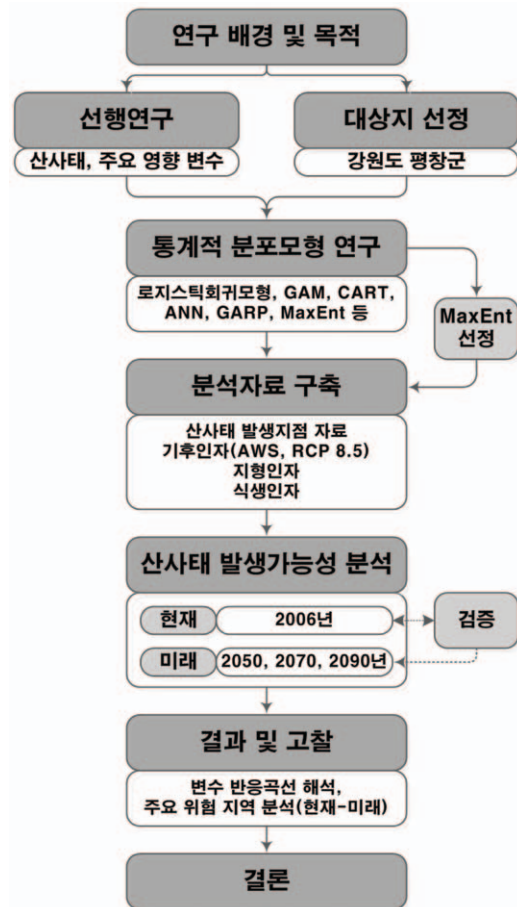


그림 1. 연구 흐름도

요구하는 자료의 특성에 따라 출현자료와 비출현자료를 모두 요구하는 모형과 출현자료만을 요구하는 모형으로 분류할 수 있다. 출현/비출현자료를 모두 필요로하는 모형의 경우에는 산사태 발생지점(출현자료)과 함께 산사태 미발생지점(비출현자료)을 모형에 입력하여야만 한다. 그러나 대상지에 대해서 발생지점에 대한 자료는 명확하지만 미발생지점에 대한 자료는 구축되어 있지 않으므로 발생지점을 제외한 지역에 대한 현장조사를 실시하거나, 현장조사가 어려운 경우에는 임의의 지점을 추출하여(random point sampling) 사용할 수밖에 없다. 하지만 임의의 지점을 추출하여 비출현자료로 사용하게 되는 경우, 모형이 불확실성을 갖게 될 가능성이 커지게 된다.

표 1. 통계적 분포 모형들의 특성

모 형	특 성	요구하는 자료
GLM (Generalized Linear Model)	<ul style="list-style-type: none"> • 선형 모형 • 범주형 설명변수자료에 응용 • 로지스틱 회귀모형의 유형 	출현/비출현자료 요구 모형
GAM (Generalized Additive Model)	<ul style="list-style-type: none"> • 비선형 모형 • smooth function을 이용하여 비선형적 연속형 독립변수 처리에 이용 • 대표모형으로 GRASP 3.0이 있음 	
CART (Classification and Regression Tree)	<ul style="list-style-type: none"> • 비선형 모형 • regression tree와 classification tree의 두 가지 변수로 구성되는 prediction tree로 회귀분석을 위한 복잡한 구조 제작을 도움 • 긍정/부정 혹은 만족하는 값(수치)에 따라 가지의 방향이 뻗어나가 결과에 도달하는 원리 	
ANN (Artificial Neural Network)	<ul style="list-style-type: none"> • 비선형 모형(선형/비선형 자료 이용가능) • 인공신경망 원리를 활용한 모형 	
GARP (The Genetic Algorithm for Rule-Set Prediction)	<ul style="list-style-type: none"> • 비선형 모형 • 인공지능 체계를 사용하여 긍정/부정 법칙 세트를 생성, 2진법으로 예측 • 지구온난화 관련 분석에 자주 이용 	출현자료 요구 모형
MaxEnt (Maximum Entropy Model)	<ul style="list-style-type: none"> • 비선형 모형 • 최대 엔트로피 기법을 활용하여 출현자료만으로 생물의 분포를 예측 • ROC 곡선을 이용한 AUC 값 제공 	

본 연구에서는 강원도 평창군 전체지역을 대상으로 분석을 하고자 하였으므로, 비출현자료에 대한 현장조사 자료구축이 어려웠기 때문에 출현자료만을 활용하는 모형을 이용하는 것이 더욱 적합할 것으로 판단하였다. 특히 MaxEnt 모형은 Phillips *et al.*(2006)과 Elith *et al.*(2006)를 통해 출현자료만을 요구하는 모형들 중에서도 신뢰도가 가장 높은 것으로 밝혀지면서 그 우수성이 증명된 모형이다. Phillips *et al.*(2006)은 수용자 반응특성(ROC, receiver operating characteristic)곡선 분석 방법¹⁾을 통하여 MaxEnt 모형의 정확성이 더 높음을 증명하였다. 실제로 MaxEnt 모형은 동·식물 분포 모형에 많이 사용되고 있으며(Tuanmu *et al.* 2010), 최근에는 산사태 연구에서도 적용되었으며, 모형간 비교를 통해 신뢰성이 가장 높은 것으로 결과가 도출되었다(Felicitimo *et al.*, 2012; Vorpahl *et al.*, 2012). 따라서 본 연구에서는 이들 중 가장 적합한 모형으로 MaxEnt 모형을 선정하였다. 본 연구에서는 무료로 배포되는 3.3.3k버전의 MaxEnt 소프트웨어를 사용하였다(Phillips *et al.*, 2004; Phillips and Dudik, 2008).

(2) 분석자료 구축

산사태 모형 구동에 필요한 입력자료는 크게 산사태 발생지점(출현지점) 자료와 산사태 관련 변수로 구분할 수 있다. 본 연구에서 산사태 발생지점 자료는 강원도청에서 제공한 자료로써, 2006년 7월경 태풍 에위니아로 인해 강원도 평창군에서 발생한 산사태 발생지점 자료를 이용하였다. 총 발생지점의 수는 2,425개이며, 이 중 무작위 추출법을 통해 500개의 발생지점을 추출하여 이용하였다.

산사태 관련 변수는 크게 기후인자, 지형인자, 식생인자로 구성되며 기존 산사태 관련 연구들의 변수들을 참고하여 선정하였다. 특히 산사태 발생에 대하여 영향력이 큰 것으로 판단되는 기후인자의 변수들은 산사태 취약성 평가에서 사용된 변수와 산사태에 영향을 미치는 주요한 강우량 지수를 참고하여 선정하였다(이부경, 2003; 국립환경과학원, 2012).

1) Receiver Operating Characteristic Curve의 약자이며 각 모델의 설명력을 측정하는 방법 중 하나이다. ROC는 관찰된 토지이용변화와의 예측 정확성을 측정하기 위해서 사용되는 지표이다. ROC 분석에서 곡선이 좌상의 꼭짓점에 가까울수록 평가모형이 우수하다는 것을 나타내며 곡선 아래의 면적을 AUC(Area under curve)라 하여 그 크기로 모형의 설명력을 평가할 수 있다(Swets, 1988).

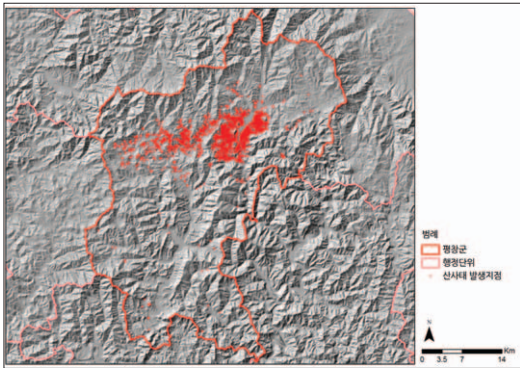


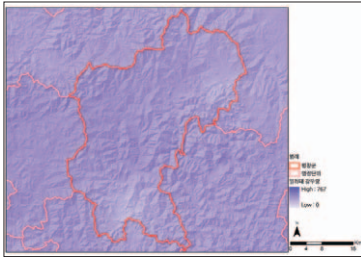
그림 2. 산사태 발생지점(강원도 평창군)

일최대 강우량과 일강우량이 80mm 이상인 날의 횟수는 집중강우에 대한 변수이며, 5일주기 최대 강우량은 누적강우에 대한 변수로서 반영하였다. 기후인자들은 현재와 미래시점으로 구분된다. 현

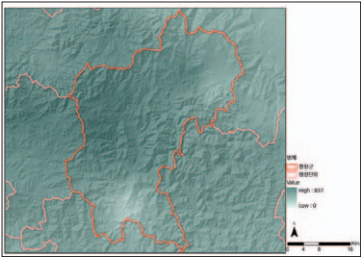
재시점의 기후인자들은 태풍 에위니아가 도래한 시점인 2006년 7월에 대한 기상청의 자동기상관측시스템(Automatic Weather System, AWS) 자료를 이용하여 제작하였다. 전국의 AWS 지점자료 중 2006년 자료에 대하여 연중 일최대 강우량, 연중 일강우량이 80mm 이상인 날의 횟수, 연중 연속된 5일의 강우량 합이 가장 큰 시기를 도출하였다. 각 지점 별로 도출된 지표 값을 GIS의 보간법 중 IDW (Inverse Distance Weight) 기법을 활용하여 도면화하였다. 미래시점의 기후인자들은 기상청에서 제공하는 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 이용하여, 현재시점의 기후인자와 동일한 방법으로 제작하였다. 다만 시나리오 자료는 지점별로 예측되는 것이 아닌 격자단위로 예측되는 것으로 보간법을 사용하지 않았

표 2. 산사태 발생가능성 분석 변수목록 및 특성

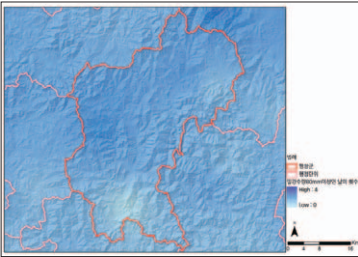
분 류	변 수	GIS 자료 유형	축척 및 해상도	참고자료(연도)
기후인자	일최대 강우량	ARC/INFO Point(present), GRID(future)	1,000m×1,000m	기상청
	5일주기 최대 강우량			AWS 자료(2006)
	일강우량이 80mm이상인 날의 횟수			RCP8.5시나리오(2012)
지형인자	경 사	ARC/INFO polygon	1:25,000	환경부 DEM(2008)
	고 도			
	방 위			
	하천으로부터의 거리			WAMIS 하천차수도(2008)
	토 심			환경부 정밀토양도(2008)
식생인자	침엽수, 활엽수, 혼효림	ARC/INFO polygon	1:25,000	환경부 토지피복도(2008)
	영 급			환경부 4차 임상도(2005)
	경 급			
	자연림, 인공림			



일최대 강우량



5일주기 최대 강우량



일강우량 80mm 이상 횟수

그림 3. 변수 지도화

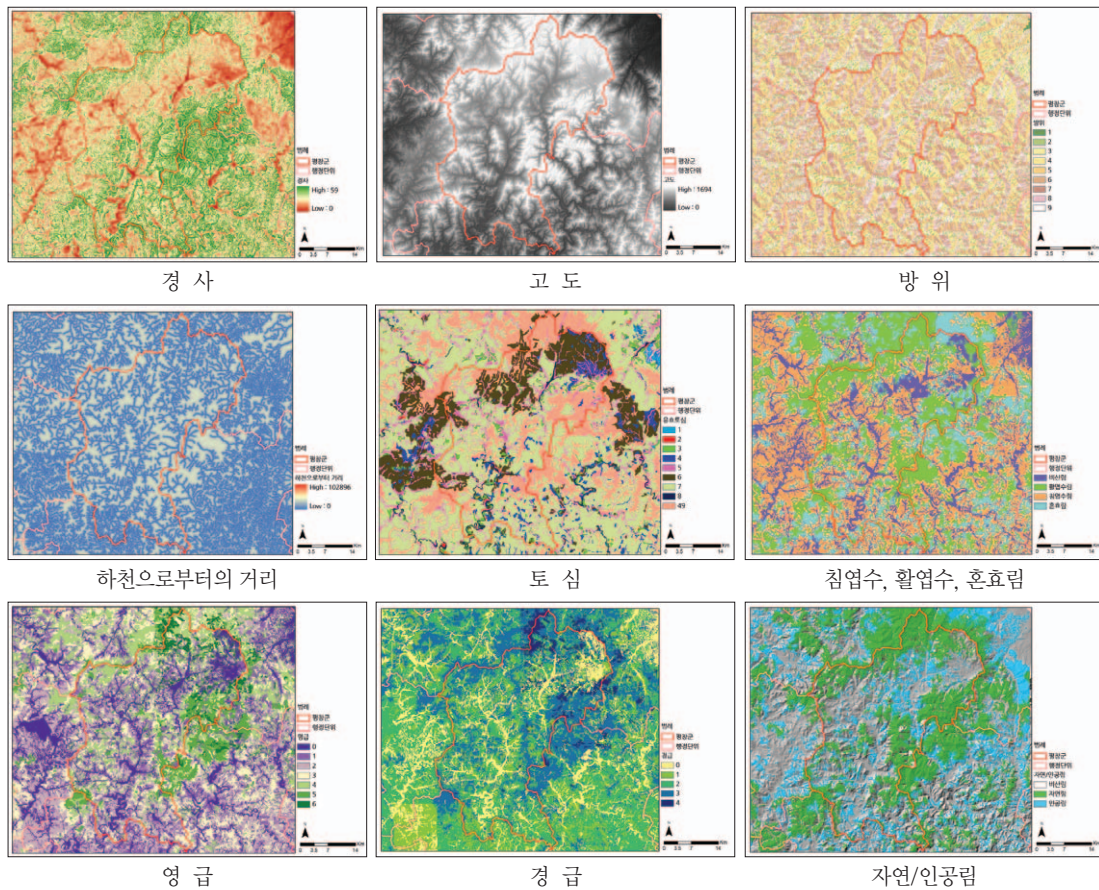


그림 3. 계속

다. 본 연구에서는 시나리오에 따른 기후변화 경향을 이용하는 것이 아니라, 미래의 특정 시점을 대상으로 하는 것이므로 기후변화의 경향을 파악할 때 사용하는 30년 평균 기후를 사용하지 않고, 2050년, 2070년, 2090년의 시나리오 값을 목표연도로 사용하였다.

지형인자와 식생인자들은 환경부, 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 자료를 이용하여 작성하였다(그림 3). 분석을 위한 평가단위는 기후변화 시나리오 자료가 1,000m×1,000m이므로 다운스케일링 시에 발생하는 문제점과 연구결과의 정밀성을 함께 고려하여 100m×100m로 설정하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 산사태 발생가능성 분석 결과

2006년 당시의 산사태 발생지점 자료와 변수들을 기반으로 MaxEnt 모형을 구동한 결과, 그림 4와 같은 산사태 발생가능성 지도가 도출되었다. 모형 구동 시에는 3-fold cross-validation으로 검증하여 도출된 값을 결과로 이용하였다. ROC 곡선을 통해 도출된 모형의 AUC(Area under curve) 값은 0.92로 모형의 예측정확도는 매우 높게 나타났다.²⁾ 산사태 발생가능성은 최대 74.3%로 나타났다. 또한 모형의 검증을 위해 평창지역과 함께 산사

2) Phillips and Dudik(2008)은 AUC값이 약 0.7이상일 때, 모형이 설명하는 잠재력이 의미를 갖는다고 판단하였다.

태 피해가 컸던 횡성군의 산사태 발생지점 150개의 발생가능성을 추출한 결과, 최소 42%에서 최대 67%의 발생가능성을 갖는 것으로 나타났으며, 평균은 62%인 것으로 도출되었으며, AUC 값은 0.89로 나타났다. 따라서 산사태 발생가능성 모형의 신뢰도는 높은 것으로 판단된다. 한편, 도면의 좌측

중단에 원형으로 형성된 확률이 낮은 지역은 '면온' 지점의 AWS 자료가 있는 지역이다. 해당 지역의 강우량 값은 높게 측정되었으나 구축된 산사태 발생지점 자료가 없어, 모형 구동에 있어서 원활하게 반영이 되지 못하여 원형의 결과가 도출된 것으로 파악된다.

그림 5는 모형에 입력된 주요한 변수들과 산사태 발생지점 간의 특성을 파악할 수 있는 반응곡선들을 정리한 것이다. 반응곡선을 통해 산사태 발생가능성이 급격하게 높아지는 구간 및 특성을 정리하고, 이러한 구간 및 특성들이 평창군의 지역적인 특성과는 어떠한 관계가 있는지를 참고하기 위하여 각 변수의 구간 및 특성에 대한 평창군의 평균값 또는 면적 비율(%)을 정리하였다(표 3). 또한 MaxEnt 모형 구동 시에 반영된 변수 별 기여도를 함께 정리하였다. 가장 기여도가 높은 변수들은 기후인자로

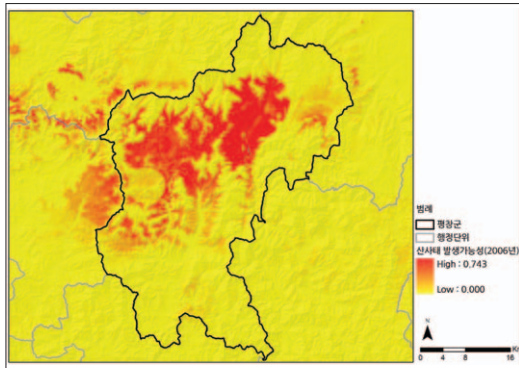


그림 4. 산사태 발생가능성(2006년)

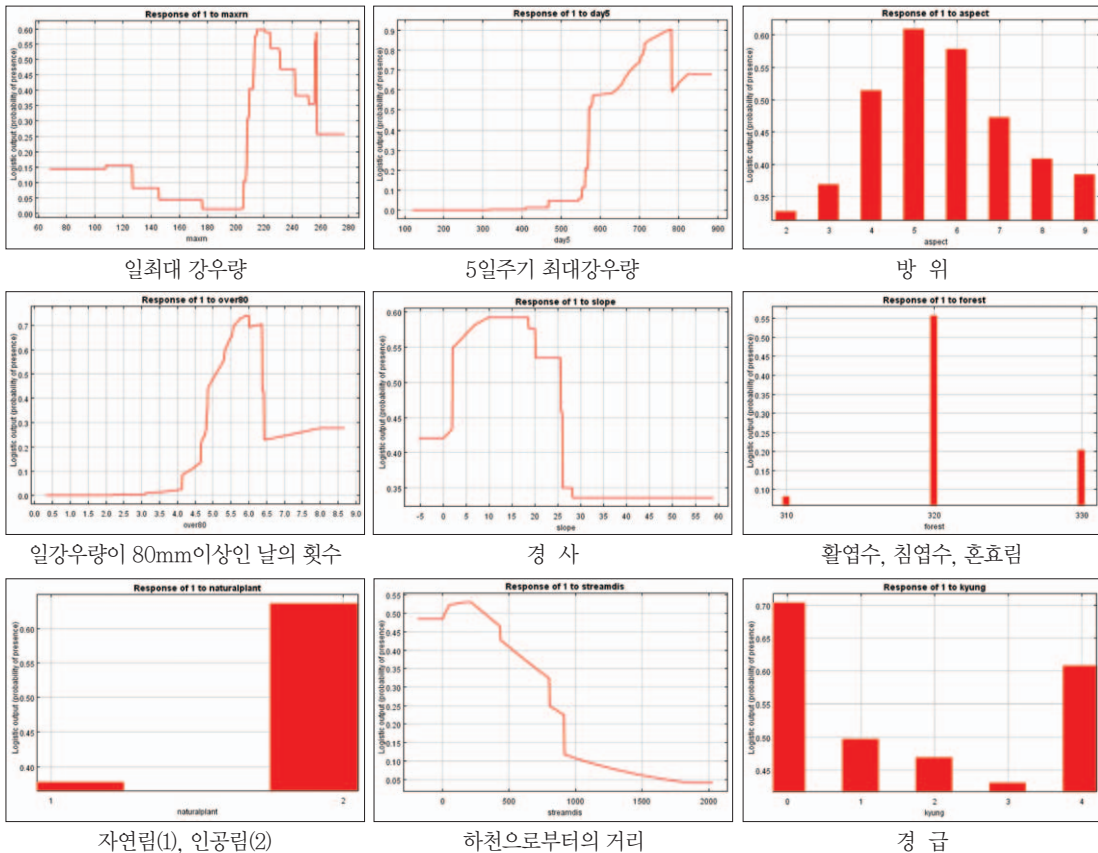


그림 5. 변수 별 반응곡선

표 3. 산사태 관련 변수 특성

분 류	변 수	특 성	평창군 평균값 · 면적(%)	변수 기여도 순위
기후인자	일최대 강우량	210mm 이상	평균 154mm	4
	5일주기 최대 강우량	600mm 이상	평균 278mm	1
	일강우량이 80mm이상인 날의 횟수	5회 이상	평균 3회	2
지형인자	경사	10~18도	평균 16.98도	7
	고도	550~700m	평균 754m	3
	방위	동, 남동, 남	40.62%	13
	하천으로부터의 거리	500m 이내	•	11
	토심	35cm 이하	•	8
식생인자	활엽수림, 침엽수림, 혼효림	침엽수	43.59%	5
	영급	1영급 이하, 6영급 이상	•	9
	경급	1경급 이하, 4경급 이상	•	12
	자연림, 인공림	인공림 가능성 높음	•	6

나타났으며, 특히 5일주기 최대 강우량, 일강우량이 80mm이상인 날의 횟수가 높은 기여도를 보였다. 이는 우리나라의 산사태가 주로 여름철 강우에 의해 발생하는 경우가 많다는 점과 일치하는 것으로 판단된다. 지형인자와 식생인자는 서로 비슷한 기여도를 보였으며 고도, 임상(활엽수림, 침엽수림, 혼효림), 자연림 · 인공림 등이 높은 기여도를 보였다.

표 3을 통해서 평창군에 평균적으로 많은 기후, 지형, 식생에서 산사태가 많이 발생하기 보다는 특정한 조건에서 산사태가 발생한다는 사실을 파악할 수 있다. 예를 들어 강우량은 평균값을 크게 초과하는 지역에서 산사태 발생가능성이 높게 나타났고, 고도 또한 평균고도 보다는 낮은 지역에서 산사태가 많이 일어나는 것으로 나타났다. 침엽수림은 산림의 43.59%를 차지하고 있으나 산사태 발생가능성은 다른 임상에 비해 훨씬 큰 것으로 나타났다(그림 5). 또한 자연림은 인공림에 비해 2배 이상 넓은 면적을 가지고 있으나 산사태 발생가능성은 인공림이 자연림에 비해 매우 높은 것으로 나타났다. 한편 영급과 경급은 매우 낮거나 매우 높은 산림에서 산사태가 발생하는 특성을 보였다. 영급과 경급이 낮은 지역에서는 수목이 없어 산사태에 대한 방지 역할을 하지 못하기 때문으로 판단되며, 영급과 경급이 높은 지역은 극상림 상태에서 수종이 단순화되고 하층식생의 발달이 부족해지면서 산사태 발생가

능성이 높아지는 것으로 추정된다.

따라서 MaxEnt 모형이 파악한 산사태 발생가능성이 높은 지역은 평창군의 일반적인 지역이 아니라 특정한 조건을 만족하는 지역에서 발생한다는 사실을 파악할 수 있다.

한편 경사도는 10~18도인 지역에서 발생가능성이 높은 것으로 파악되었는데, 산사태 발생지점 조사 자료의 특성을 살펴보았을 때 최소 0.2~33.6도의 범위를 보였으며, 평균값은 12.8도로 나타났다. 산사태 발생지점의 평균 경사가 평창군의 평균 경사보다 낮게 나타난 것은 산사태 발생지점의 대부분이 도로가 개발된 하천변에 인접한 산림으로 나타났다기 때문이다. 이는 도로의 개발로 생겨난 인공비탈면에 인접한 산림이 집중강우로 인한 영향에 취약했기 때문으로 판단된다.

2. 미래의 산사태 발생가능성 예측 결과

현재의 산사태 발생가능성 모형을 바탕으로 RCP 8.5 기후변화 시나리오의 기후인자를 반영하여 미래에 대한 발생가능성을 분석하였다(그림 6). 미래의 분석시점으로는 2050년, 2070년, 2090년으로 3개의 목표연도를 설정하였다. 기후변화 시나리오에 따르면, 2006년에 비하여 2050년에는 산사태 발생가능성이 증가하였다가 2070년에는 다소 감소하는 경향을 보이고, 2090년에는 다시 증가하는 것

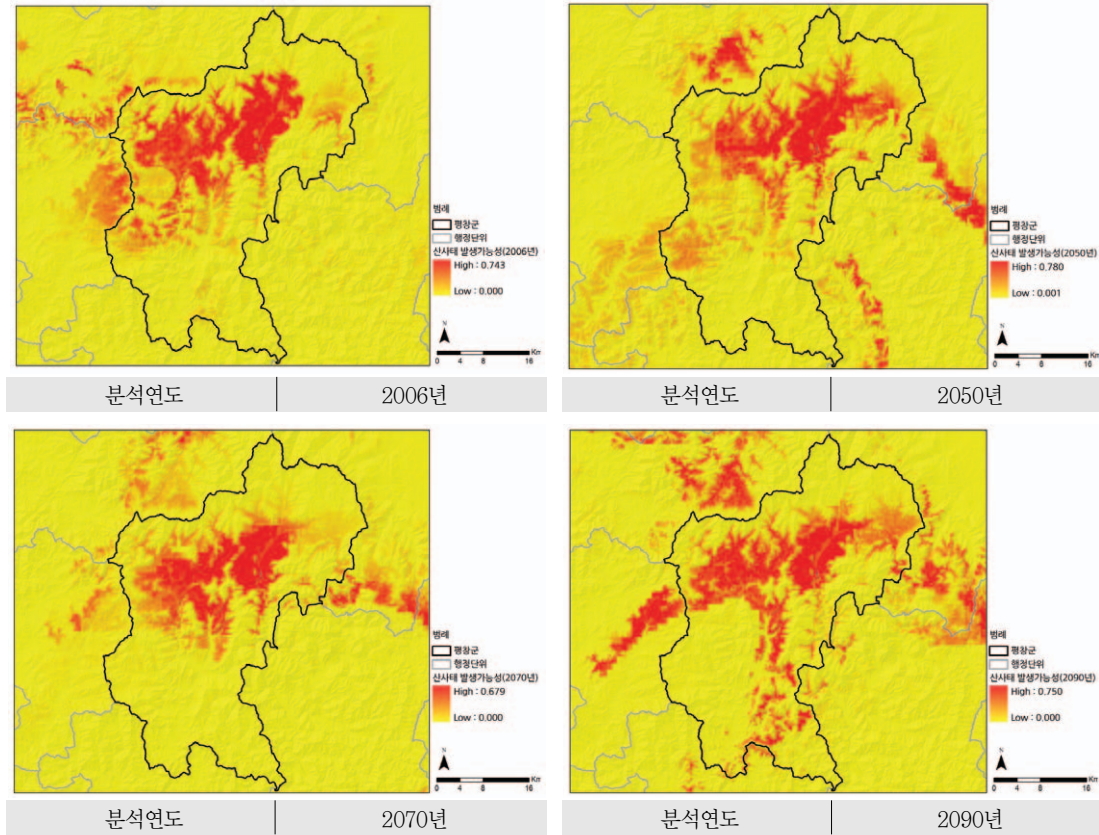


그림 6. 산사태 발생가능성 분석결과(2006, 2050, 2070, 2090년)

으로 나타났다. 또한 산사태 발생가능성이 50%를 넘는 주요 산사태 위험 지역의 면적은 2070년을 제외하고는 2006년보다 증가하는 것으로 나타났다(표 4). 따라서 평창군은 미래에도 전반적으로 산사태 발생가능성이 높을 것으로 예측되었다.

표 4. 연도별 산사태 발생가능성 50%이상 면적

연 도	면적(km ²)
2006	98.31
2050	118.36
2070	96.18
2090	130.37

한편 2070년에 산사태 발생가능성이 감소하는 것은 당시의 강우량이 감소하였기 때문에 나타난 결과이며, 각 연도에 따른 기후인자의 특성은 표 5와 같이 나타났다. 일최대 강우량은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 5일주기 최대 강우량 또한 2070년에 다소 감소하는 경향을 보이나 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 일강수량 80mm 이상인 날의 횟수는 미래에 다소 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 일최대 강우량, 5일 주기 최대 강우량이 증가하는 반면에 80mm 이상인 횟수가 감소하였다는 사실을 통해, 누적강우나 집중강우의 강

표 5. 기후인자 별 최대값(현재~미래)

기후인자		2006년	2050년	2070년	2090년
일최대 강우량(mm)	최대값	767	1,423	1,065	971
5일주기 최대 강우량(mm)	최대값	837	2,128	1,184	1,641
일강수량 80mm 이상 횟수(회)	최대값	4	6	6	8

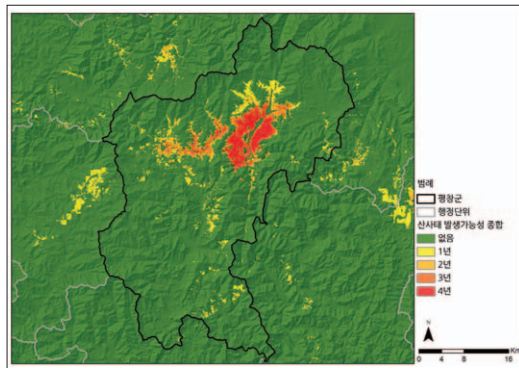


그림 7. 산사태 발생가능성 종합(2006, 2050, 2070, 2090년)

도는 2006년보다 더욱 커질 가능성이 있다고 판단된다.

미래의 산사태 발생가능성 예측 결과와 관련하여 특히 주목할 점은, 2006년 당시 태풍으로 인한 최대 피해지역이었던 평창에는 연간강우량의 절반을 넘는 기록적인 강우가 발생했었다는 점이다. 2006년에 평창군의 산사태 피해가 매우 컸다는 점을 고려할 때 2050년, 2090년 또한 2006년과 유사하거나 더 큰 규모의 산사태가 발생할 가능성이 높은 것으로 예상된다.

현재에서 미래에 이르기까지의 주요 산사태 위험지역을 종합적으로 파악하기 위하여, 2006년에서 2090년까지 산사태 발생가능성이 50%가 넘는 지역을 중첩하여 산사태 발생가능성이 높은 지역을 종합하였다(그림 11). 산사태 발생가능성을 종합한 결과, 산사태 발생지점 조사자료가 있는 지역을 중심으로 2006년, 2050년, 2070년, 2099년에 4회 연속으로 발생가능성이 높은 위험지역이 나타났으며, 발생지점과 특성이 유사한 산지에서도 4년 연속은 아니더라도 산사태에 위험한 지역들이 도출되었다. 4년 연속 발생가능성이 높게 나타난 지역을 최우선적인 적응대책 수립 대상지역으로 선정하되, 지속적으로 산사태 발생가능성이 높게 나타나지 않은 지역 또한 한 해라도 산사태 발생가능성이 높게 나타났다면 산사태에 대한 적응대책의 권고가 필요하다고 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 강원도 평창군을 대상으로 산사태 발생지점 조사자료와 기후인자, 지형인자, 식생인자를 기반으로 MaxEnt 모형을 구동하여 산사태 발생가능성을 분석하였다. 모형의 예측정확도는 0.92로 매우 높은 것으로 나타났다. 분석결과, 산사태의 발생에 주요한 영향을 미치는 인자는 기후인자로 나타났다. 이는 우리나라의 산사태가 주로 여름철 강우량에 의한 것이라는 점에서 실재를 잘 반영한 것으로 판단된다. 지형과 식생인자는 대부분이 선행연구를 통해 도출된 산사태 발생가능지역과 유사한 특성을 갖는 것으로 나타났으나, 고도와 경사는 지역적인 특성과 발생지점 조사자료의 특성에 따라 다소 다른 경향을 보였다.

또한 기후변화에 따른 강우량 증가가 산사태에 미칠 수 있는 영향을 분석하기 위하여 RCP 8.5 시나리오를 이용하여 2050년, 2070년, 2090년의 산사태 발생가능성을 예측하였다. 미래에는 2070년을 제외하고는 산사태 발생가능성이 증가하는 것으로 예측되었으며, 이러한 결과는 미래에는 집중강우와 누적강우가 증가하는 경향을 보이기 때문으로 판단된다. 특히 2006년에는 평창군에 기록적인 강우가 발생했었다는 점을 고려할 때, 미래에는 이보다 더 심각한 강우가 발생하고 이에 따른 산사태의 발생가능성과 규모가 커질 것으로 예상된다.

본 연구는 우리나라 산사태 발생의 주요원인인 강우량에 초점을 맞추어 기후변화에 따른 강우량 증가를 반영한 산사태 발생가능성 예측 연구를 실시하였다는 점, 또한 국내 산사태 연구에 대해서는 최초로 MaxEnt 모형을 적용하였다는 점에서 의의를 갖는다. 한편, 본 연구에서는 기후변화에 따른 식생분포변화를 반영하지 못했다는 점, 자료구축의 한계로 지질인자에 대한 반영이 부족하다는 점, 발생지점 자료가 밀집되어서 나타나는 공간적 자기상관성이 모형에 미칠 수 있는 영향을 고려하지 못했다는 점에서 한계를 갖는다. 또한 발생가능성 50%의 기준은 출현과 비출현을 고려하여 설정된 값으로 보다 정확한 산사태 위험기준을 파악하기 위해

서는 전문가 설문조사를 통한 기준설정이 필요하다고 판단된다.

연구결과를 통해 기후변화의 영향으로 평창군의 산사태 발생가능성이 더욱 높아지고 발생규모 또한 증가할 것으로 예상되므로, 산사태 발생가능성 종합 지도에서 나타난 바와 같이, 2006년에서 2090년에 이르기까지 산사태 발생가능성이 지속적으로 높은 지역에 대해서는 적응대책 수립이 시급하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 “산림 생태계서비스의 기후변화 리스크 평가 및 관리체계 수립을 위한 연구”과제를 기반으로 수행되었습니다.

참고문헌

국립환경과학원, 2012, 기후변화 부문별 취약성 지도.
권혁춘, 이병걸, 이창선, 고정우, 2011, 로지스틱회귀분석기법과 인공신경망기법을 이용한 제주지역 산사태가능성분석, 한국지형공간정보학회지 19(3), 33-40.
김경수, 김원영, 채병공, 송영석, 조용찬, 2005, 강우에 의해 발생한 자연사면 산사태의 지질공학적 분석 -용인·안성지역을 대상으로-, 대한지질공학회지 15(2), 105-121.
김기홍, 정해련, 박재현, 마호섭, 2011, 경남지역 산사태 발생지의 강우 및 지형특성분석, 한국환경복원기술학회지 14(2), 33-45.
김석우, 전근우, 김진학, 김민식, 김민석, 2012, 2011년 집중호우로 인한 산사태 발생특성분석, 한국임학회지 101(1), 28-35.
박종민, 마호섭, 강원석, 오경원, 박성학, 이성재, 2010, 전라북도 지역의 산사태발생 특성분석, 농업생명과학연구 44(4), 9-20.
연영광, 2011, 로지스틱 회귀분석 기법을 이용한 강원도 산사태 취약성 평가 및 분석, 한국지리

정보학회지 14(4), 116-128.
오치영, 김경탁, 최철웅, 2009, SPOT5영상과 GIS 분석을 이용한 인제지역의 산사태 특성 분석, 대한원격탐사학회지 25(5), 445-454.
윤홍식, 이동하, 서용철, 2009, GIS 기법 및 발생자료 분석을 이용한 산사태 위험지도 작성, 한국지리정보학회지 12(4), 59-74.
이명진, 이사로, 전성우, 2012, 미래 확률강우량 및 인공신경망을 이용한 산사태 위험도 분석 기법 개발 및 검증, 한국지리정보학회지 15(2), 57-70.
이부경, 2003, 지질방재공학, pp. 241-245.
이수곤, 1999, 부산지역의 산사태 위험 연구, 한국환경복원녹화기술학회지 2(2), 9-23.
이진덕, 연상호, 김성길, 이호찬, 2002, 산사태의 발생가능지 예측을 위한 GIS의 적용, 한국지리정보학회지 5(1), 38-47.
조명희, 조운원, 2009, 기상과 지형자료를 통합한 산사태 위험지 예측 기법 개발 -울진지역을 대상으로-, 한국지리정보학회지 12(2), 1-10.
Elith J., Ferrier S., Huettmann F., and Leathwick J., 2006, The evaluation strip: A new and robust method for plotting predicted responses from species distribution models, Ecol Model 186(3), 280-289.
Felicisimo, A., Cuartero A., Remondo J. and Quiros E., 2012, Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study, Landslides (7 March 2012), pp.1-15.
Mathewson, C.C., Keaton, J.R. and Santi, P.M., 1990, Role of Bedrock Ground Water in the Initiation of Debris Flows and Sustained Post-Flow Stream Discharge, Bulletin of the Association of Engineering

- Geologists 27(1), 73-83.
- Phillips, S.J., Anderson R.P. and Schapire R.E., 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning, Banff, Alberta, Canada, p. 83 ff.
- Phillips, S.J. and Dudik, M., 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31, 161-175.
- Pradhan B. and Lee S., 2010, Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, *Environment Earth Science* 60, 1037-1054.
- Vorpahl, P., Helmut E., Michael M. and Boris S., 2012, How can statistical models help to determine driving factors of landslides?, *Ecological Modelling* 239, 27-39.

최종원고채택 13. 01. 22